3 Interacciones de la radiación con la materia

Introducción

La teledetección está basada en la adquisición de información procedente de un objeto lejano sin mediación de contacto físico, a partir de la medida de la energía electromagnética que, procedente del blanco, alcanza el sensor. Esta energía puede estar generada por el propio objeto mediante la transformación de otras formas de energía, o ser simplemente la que refleje su superficie tras ser iluminada por una fuente exterior como el Sol o bien un sistema generador instalado en la misma plataforma.

La capacidad de la teledetección para discriminar e identificar superficies o coberturas diferentes reside en que cada una de ellas responde de un modo característico y diferente a la radiación en las distintas zonas del espectro electromagnético, de acuerdo con su composición química y en parte también con su estructura física, las cuales se manifiestan en *signaturas espectrales* diferentes.

Estudiar de un modo general el comportamiento espectral de las superficies que pueden ser detecta-das por un sensor en órbita o aerotransportado viene a concretarse en el estudio de la respuesta de los suelos desnudos –comprendiendo en un sentido amplio todas las posibilidades de presentación del material litológico, desde las rocas vivas hasta los suelos más evolucionados a partir de ellas–, de la vegetación, de la mezcla de ambas en toda su gama de proporciones, del agua y de las superficies de hielo o nevadas, ya que en ellas consiste la totalidad de la superficie firme del planeta, excluidas las áreas urbanizadas o ciertos tipos de superficies artificiales o minoritarias. Por ello, el objeto de este apartado es profundizar en las bases de la respuesta espectral de los suelos, de la vegetación y de sus mezclas, del agua y de la criosfera en amplias regiones del espectro.

La interacción entre la radiación electromagnética y la materia puede estudiarse a nivel macroscópico y a nivel atómico y molecular. Conocer los principios básicos de lo que sucede en estas dos escalas es el objeto de los siguientes apartados.

Interacción macroscópica

Las interacciones macroscópicas entre la radiación y el suelo son debidas a fenómenos tales como la reflexión, la absorción, la transmisión, y la refracción. Cuando un flujo de energía radiante Φ_e^i incide sobre una superficie, parte de él es reflejado hemisféricamente, originando un flujo radiante reflejado Φ_e^r. Otra parte es absorbida por el material, constituyendo un cierto flujo radiante Φ_e^a. Por último, una fracción Φ_e^t del flujo radiante incidente puede ser transmitida, hacia capas inferiores, a veces en otras formas de energía. Por el principio de conservación, debe verificarse que:

$$\Phi_e^r + \Phi_e^a + \Phi_e^t = \Phi_e^i \qquad (1)$$

o lo que es lo mismo:

$$\frac{\Phi_e^r}{\Phi_e^i} + \frac{\Phi_e^a}{\Phi_e^i} + \frac{\Phi_e^t}{\Phi_e^i} = 1 \qquad (2)$$

es decir:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \qquad (3)$$

siendo:

$$\rho = \frac{\Phi_e^r}{\Phi_e^i}; \qquad \alpha = \frac{\Phi_e^a}{\Phi_e^i}; \qquad \tau = \frac{\Phi_e^t}{\Phi_e^i} \qquad (4)$$

Los términos ρ, α, y τ reciben respectivamente los nombres de *reflectancia*, *absorbancia* y *transmitancia*. Algunos autores enfatizan el carácter relativo de estos parámetros denominándolos respectivamente *reflectividad*, *absortividad* y *transmisividad*.

La emisión de un flujo con posterioridad a la iluminación del terreno se hace a expensas de la energía absorbida previamente y, por tanto, no contabiliza en el trinomio de conservación de la energía.

Si se considera un cuerpo negro, dado que se trata de un receptor de energía perfecto, su reflectancia y su transmitancia deben ser nulas. Por lo general, si el objeto considerado es suficientemente grueso, la transmitancia deberá ser muy pequeña. En ciertos casos, en aras de simplificar la formulación, puede despreciarse esta componente del trinomio si se amplía suficientemente el espesor de la capa estudiada. Por otro lado, si la superficie receptora es oscura y rugosa, la reflectancia será casi nula. Expresada como porcentaje, la reflectancia también se conoce con el nombre de albedo.

Cuando la superficie de incidencia es suficientemente lisa en relación con la longitud de onda incidente, la reflexión producida se llama especular y su proporción depende del índice complejo de refracción del material y del ángulo de incidencia del haz de radiación.

Numerosas propiedades ópticas del suelo están relacionadas con el índice complejo de refracción:

$$m = n - iK \qquad (5)$$

donde la parte real (n) es el índice de refracción real, que depende de las velocidades de la luz en el vacío (c) y en el material en cuestión (v):

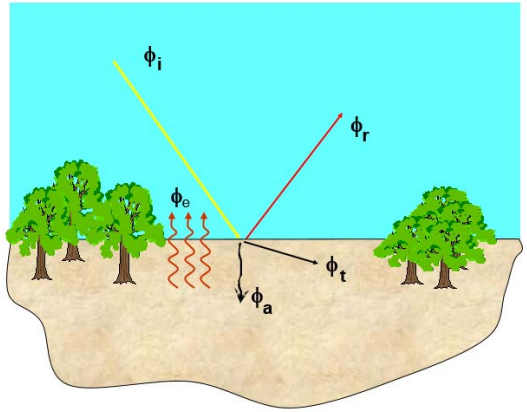
$$n = \frac{c}{v} \qquad (6)$$

La parte imaginaria (K) se denomina coeficiente de extinción. Cuando un haz de luz atraviesa una capa isótropa, la disminución relativa de la intensidad de la onda es, según la ley de Lambert-Beer-Bouguer:

$$\frac{-dE}{E} = adx \qquad (7)$$

donde a es una constante que recibe el nombre de *coeficiente de absorción del material* y x es el espesor de la capa atravesada. Integrando se tiene:

$$E_x = E_0 e^{-ax} \qquad (8)$$



Distribución del flujo incidente sobre una superficie.

siendo E_x y E_0 los flujos emergente e incidente, respectivamente. Los coeficientes de extinción y de absorción están relacionados mediante la ecuación:

$$K = a\lambda / 4\pi \tag{9}$$

en la que λ es la longitud de onda de la radiación. Sustituyendo K:

$$a = \frac{4\pi}{\lambda} K = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{m-n}{i} = -\frac{4\pi}{\lambda}(m-n)i \tag{10}$$

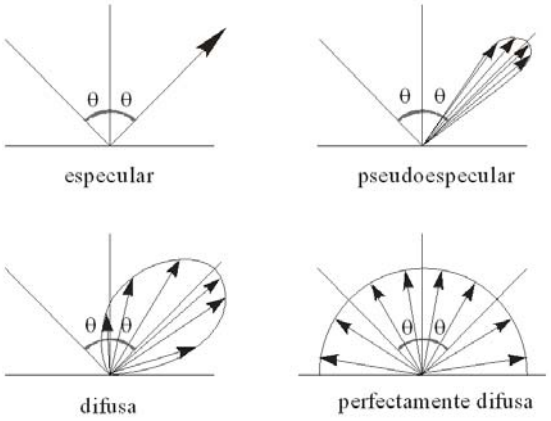
con lo cual, la energía emergente es:

$$E_x = E_0 e^{-\frac{4\pi}{\lambda} x(m-n)i} \tag{11}$$

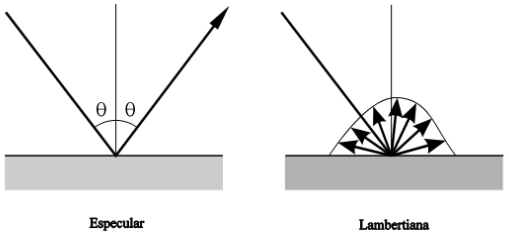
expresión que muestra que la energía emergente en relación con la incidente depende del índice complejo de refracción.

En la naturaleza generalmente la reflexión no es especular, sino que presenta un grado de difusión más o menos acentuado, dependiendo de la rugosidad de la superficie. En este contexto, la rugosidad debe entenderse como un concepto relativo que tiene que ver con la longitud de onda incidente. Superficies que pueden considerarse lisas ante radiaciones de longitudes de onda larga son realmente rugosas estudiadas bajo un haz de radiación de onda corta. El criterio de Rayleigh sirve para establecer cuantitativamente la rugosidad:

$$g = 4\pi \frac{s_h}{\lambda} sen\theta \tag{12}$$



Tipos de reflexión sobre una superficie.



Tipos de superficie por su hábito reflexivo.

donde s_h es la desviación típica de la altura en torno al valor medio local, λ la longitud de onda y θ el ángulo de depresión del haz radiante. En general una superficie se considera lisa si $g < 0{,}3$. En la práctica, el límite a partir del cual la superficie puede considerarse lisa puede calcularse así:

$$h < \frac{\lambda}{8} \cos\theta \tag{13}$$

donde h es la altura media de las imperfecciones de la superficie.

Según sea el patrón de la dispersión del haz reflejado, la reflexión puede ser perfectamente difusa, difusa, pseudoespecular o especular. Un reflector es perfectamente difuso cuando refleja isotrópicamente la radiación, es decir, cuando dispersa igual cantidad de energía en todas las direcciones, con independencia de la dirección de incidencia. La reflectancia puede medirse desde todo el hemisferio superior a la superficie, hablándose de reflectancia hemisférica, o solamente desde una dirección determinada en la que se coloca el sensor, hablándose entonces de reflectancia direccional. Este último es el caso de las mediciones efectuadas desde satélite.

La razón que hay entre el flujo radiante reflejado por una determinada superficie y la que reflejaría una superficie lambertiana ideal con el 100 % de reflectividad se denomina factor de reflectancia.

Función de distribución de reflectancia bidireccional

El brillo de cualquier superficie es diferente cuando se observa desde posiciones distintas y cuando se ilumina desde diferentes direcciones. Este hecho tiene especial repercusión en teledetección, mediante la

cual se pretende deducir las características inherentes a la superficie observada, con independencia de su orientación, de su iluminación o de la posición relativa del sensor. Se conoce como función de distribución de reflectancia bidireccional (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*, BRDF) la ecuación que define la proporción de reflexión en cada dirección proyectada del rayo reflejado sobre el plano de la superficie, en función de la dirección de incidencia. Tal ecuación viene definida como sigue:

$$f_r(\omega_i,\omega_r)=\frac{L_e(\omega_r)}{E_e(\omega_i)} \tag{14}$$

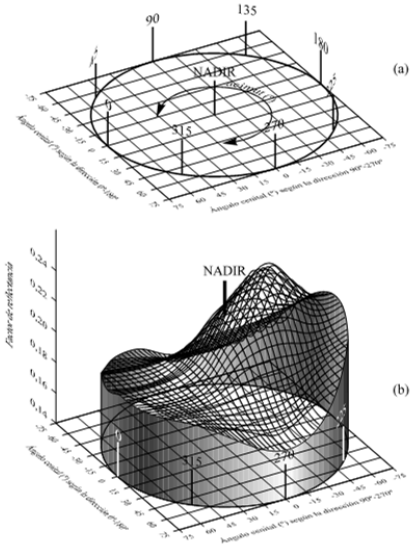
donde:

ω_i es la dirección del rayo incidente.
ω_r es la dirección del rayo reflejado.
E_i es la irradiancia.
L_r es la radiancia.

La BRDF tiene unidades de sr^{-1}. La irradiancia depende del ángulo cenital θ y del acimut de la proyección horizontal del flujo incidente ϕ. La propia función f_r depende de ese mismos ángulos y también de los ángulos homólogos que se refieren al flujo emergente, θ´ y ϕ´. La radiancia depende de los ángulos anteriores y de la magnitud de la irradiancia. Por ello se puede escribir:

$$f_r(\theta,\phi,\theta',\phi')=\frac{L_r(\theta,\phi,\theta',\phi',E_e)}{E_i(\theta,\phi)} \tag{15}$$

La BRDF depende de la longitud de onda y está determinada por las propiedades estructurales y ópticas de la superficie, tales como la distribución de las sombras proyectadas o del sombreado mutuo, la dispersión múltiple, la transmisión, reflexión, absorción y emisión por los elementos de la superficie, la densidad y la distribución de la orientación de las facetas reflectoras de la superficie. En teledetección, la BRDF es útil para corregir los efectos derivados del punto de vista y de los ángulos de iluminación, a partir de lo cual se puede deducir el albedo, realizar clasificaciones más precisas de la cubierta vegetal, etc.



Representación de la BRDF: (a) Situación planimétrica. (b) Envolvente de la energía reflejada.

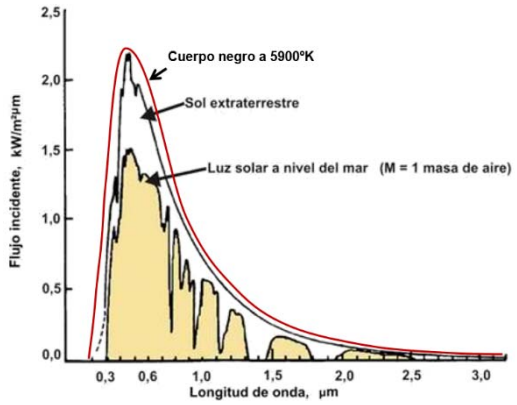
Emisividad

Los cuerpos reales no son receptores ni emisores perfectos y en general su comportamiento radiativo diverge del que tiene el cuerpo negro, en unas longitudes de onda más que en otras. Esto se traduce en diferencias entre la densidad de flujo radiante emitido por una superficie y el emitido por el cuerpo negro para cada temperatura y cada longitud de onda. La relación entre la capacidad radiante de una superficie real en comparación con la del cuerpo negro se denomina emisividad hemisférica ε:

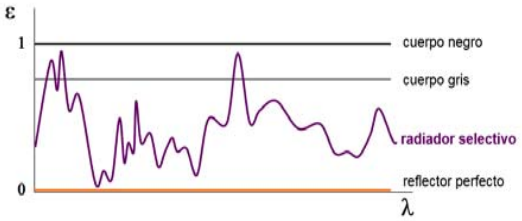
$$\varepsilon=\frac{M_e}{M_e^o} \tag{16}$$

donde M_e y M_e^o son, respectivamente, la emitancia del cuerpo en cuestión y la del cuerpo negro a la misma temperatura.

Como la emisividad de una superficie puede variar



Emitancia del cuerpo negro e irradiancia sobre otras superficies.



Emisividad de los distintos tipos de cuerpos.

con la longitud de onda, es necesario definir la emisividad espectral ε_λ:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_{e,\lambda}}{M^{o}_{e,\lambda}} \tag{17}$$

donde el numerador representa la emitancia espectral de la superficie estudiada y el denominador la del cuerpo negro a la misma temperatura que la superficie.

Puede definirse también la emisividad direccional de una superficie ε_Ω, utilizando para ello las razones de radiancia de la superficie y del cuerpo negro en lugar de la emitancia:

$$\varepsilon_\Omega = \frac{L_{e,\Omega}}{L^{o}_{e,\Omega}} \tag{18}$$

y la emisividad espectral direccional $\varepsilon_{\lambda\Omega}$:

$$\varepsilon_{\lambda,\Omega} = \frac{L_{e,\lambda,\Omega}}{L^{o}_{e,\lambda,\Omega}} \tag{19}$$

En función del valor de su emisividad hemisférica ε_λ, los cuerpos se pueden clasificar en:

- Radiadores perfectos, correspondiendo esta calificación sólo al cuerpo negro, para el que $\varepsilon_\lambda = 1$.
- Cuerpos grises, cuando $0 < \varepsilon_\lambda < 1$, siendo ε_λ constante.
- Reflectores perfectos, en los que se verifica que $\varepsilon_\lambda = 0$.

Cuando la emisividad espectral de una superficie es variable de acuerdo con la frecuencia de la emisión, esto es, cuando $\varepsilon_\lambda = f(\lambda)$, se trata de un radiador selectivo. Es el caso más frecuente en la naturaleza. Precisamente en esta propiedad se basa la identificación de superficies mediante teledetección, pues cada cuerpo se comporta de forma diferente frente a distintas frecuencias de radiación incidente, haciendo con ello posible su identificación. Cada superficie queda caracterizada por su signatura o firma espectral.

Ley de Kirchoff de la radiación

Si para una superficie con un determinado espesor puede considerarse que $\tau = 0$, la parte no reflejada del flujo incidente sobre ella se absorbe y se transforma en calor, como consecuencia de lo cual se incrementa su temperatura. En un cierto momento se alcanza el equilibrio térmico y, para ello pueda suceder, es necesario que la superficie emita el exceso de energía absorbida. Una vez establecido el equilibrio, se verificará que:

$$\rho = \frac{\Phi^{r}_{e}}{\Phi^{i}_{e}}; \quad \alpha = \frac{\Phi^{a}_{e}}{\Phi^{i}_{e}}; \quad \tau = \frac{\Phi^{t}_{e}}{\Phi^{i}_{e}} \tag{20}$$

$$\Phi^{a}_{e} = \Phi^{em}_{e} = M_e A \tag{21}$$

donde:

Φ^{em}_{e} es el flujo radiante emitido.

A es el área.

En el caso del cuerpo negro, todo el flujo radiante incidente es absorbido, por tratarse de un receptor de energía perfecto, por lo que se puede escribir:

$$\Phi^{i}_{e} = \Phi^{o,a}_{e} = \Phi^{o,em}_{e} = M^{o}_{e} A \tag{22}$$

donde

Φ_e^i es el flujo radiante incidente y todos los demás términos tienen el mismo significado que en la expresión anterior, únicamente que ahora son aplicados al cuerpo negro, que es lo que indica el superíndice 'o'.

Dividiendo miembro a miembro las dos últimas expresiones:

$$\frac{\Phi_e^a}{\Phi_e^i} = \frac{M_e}{M_e^o} \tag{23}$$

es decir:

$\alpha = \varepsilon$

que es la expresión de la ley de Kirchhoff de la radiación. En condiciones de equilibrio térmico, la absorbancia de una superficie es igual a su emisividad. En realidad, el enunciado de la ley debe aplicarse a cada longitud de onda, de esta forma:

$$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda \tag{24}$$

Esta relación, válida para los radiadores selectivos en las bandas del espectro en las que son opacos, puede transformarse en esta otra:

$$M_\lambda = \alpha_\lambda M_\lambda^o \tag{25}$$

es decir, que para una determinada longitud de onda, el poder emisivo de un cuerpo cualquiera es igual al del cuerpo negro afectado de un coeficiente igual a su absorbancia. Además, si la transmitancia no se considera, sustituyendo la absorbancia por la emisividad, puede reescribirse la ecuación de conservación de la energía de esta manera:

$$\rho_\lambda + \varepsilon_\lambda = 1 \tag{26}$$

lo que significa que reflectancia y emisividad son magnitudes complementarias, esto es, que superficies altamente reflectantes como la nieve en el espectro visible, cuyo albedo es superior al 60 %, son poco emisivas, en tanto que las poco reflectoras son altamente emisivas, como es el caso del agua líquida.

Debe hacerse la salvedad, por otro lado, de que las expresiones anteriores proporcionan la emisividad hemisférica. Sin embargo, la emisividad de una superficie real puede depender de la dirección de emisión. Por esta razón, el parámetro a estudiar debe ser la emisividad direccional, que es la relación de emitancia entre la superficie de estudio y el cuerpo negro en la dirección deseada.

Interacción atómica y molecular

La energía electromagnética que incide sobre un cuerpo es parcialmente absorbida, como se ha visto. De acuerdo con la física cuántica, esta absorción de energía produce alteraciones en el estado energético de la materia que se corresponden con niveles energéticos discretos. La energía radiante absorbida por los átomos excita su corteza y promueve los electro-

nes a niveles energéticos superiores dentro de los orbitales atómicos disponibles. El salto energético ΔE viene cuantificado por:

$$\Delta E = h\nu \tag{27}$$

siendo h la constante de Planck y ν la frecuencia de la radiación.

Los orbitales atómicos son las soluciones de la ecuación de Schrödinger, la cual define la probabilidad de la distribución electrónica. Para el átomo más sencillo con un solo electrón, el de hidrógeno, la ecuación de Schrödinger es:

$$\nabla^2\Psi + \frac{2m}{\hbar^2}\left(E - V\right)\Psi = 0 \tag{28}$$

en la que Ψ^2 representa la probabilidad de encontrar un electrón en una posición determinada (x,y,z), m es la masa del electrón, V su energía potencial, E la energía total en el instante considerado, ∇ el operador laplaciano y:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2} \tag{29}$$

Cada una de las soluciones de la ecuación de Schrödinger constituye un orbital atómico. Debido al *principio de indeterminación de Heisenberg*, no es posible conocer simultáneamente y con precisión absoluta la posición y la energía (momento) de un electrón. Por ello, los orbitales sólo son funciones probabilísticas y no deterministas. Los electrones siempre tienden a ocupar el nivel inferior de energía de entre aquéllos que estén disponibles. Por el principio de exclusión de Pauli, ningún estado energético puede estar ocupado por más de un electrón. Los saltos de los electrones excitados mediante una radiación determinada solamente se realizan entre dichos orbitales. Posteriormente los electrones vuelven a su estado original cediendo energía en forma de radiación electromagnética, en la misma o en diferente longitud de onda dependiendo de los saltos intermedios que pueda efectuar.

La formación de enlaces covalentes entre átomos para constituir moléculas origina la aparición de orbitales moleculares. El significado de éstos es análogo al de los orbitales atómicos, con la salvedad de que en las nubes de probabilidad se encuentran los electrones compartidos por los átomos constituyentes de la molécula. La estabilidad de la molécula queda explicada por la menor energía de los electrones en el orbital molecular que en la suma de los orbitales atómicos originales. Las transiciones electrónicas entre distintos orbitales moleculares se producen con la absorción o emisión de energía electromagnética. La energía necesaria para promover el salto, o la que el electrón devuelve al medio en forma de radiación electromagnética tras caer a su estado original o a cualquier otro estado energético inferior viene dada por:

$$\begin{aligned} E\Psi = \mathbf{H}\Psi &= \\ &= \frac{-\hbar^2}{2m}\left[\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}\right] + V\Psi = \\ &= \frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi + V\Psi \end{aligned} \tag{30}$$

donde **H** es el operador Hamiltoniano.

En virtud de la excitación electromagnética, los átomos pueden adquirir una cierta energía que se traduce en movimientos del núcleo o en un cambio de estado energético de los electrones. Los movimientos nucleares pueden ser traslaciones, rotaciones o vibraciones. En el material inerte de los suelos, la interacción de la luz solar se traduce predominantemente en cambios de los estados vibracionales y de los niveles energéticos de los electrones, quedando muy restringidos los fenómenos de traslación y rotación nuclear. Las vibraciones moleculares se manifiestan en la zona infrarroja del espectro.

En general, las bandas de absorción pueden ser fundamentales, armónicas o combinaciones. Las primeras se refieren a la absorción de energía por parte de las moléculas, promoviéndose al nivel energético vibracional inmediatamente superior al de reposo. Si en cambio, la transición energética incluye dos o más niveles sobre el fundamental, se habla de bandas armónicas de absorción. Por último, las bandas de combinación se deben al reparto de la energía de un fotón para elevar el nivel de energía molecular de más de un estado vibracional. Los picos principales en los espectros de absorción de los minerales se deben a vibraciones fundamentales, por ser las más frecuentes. Por el contrario, los picos debidos a los armónicos y a las bandas de combinación producen picos más débiles por la razón contraria. Las transiciones fundamentales de los minerales del suelo se manifiestan en la región del infrarrojo, por cuya razón es en este intervalo espectral en el que suelen ser estudiados en laboratorio. Existen numerosas librerías de espectros de absorción/transmisión de minerales y vegetales realizados en laboratorio en condiciones controladas y sobre muestras homogéneas y pequeñas.

Sin embargo, las bandas de absorción que caracterizan la teledetección de suelos en la región solar del espectro son sobre todo armónicas y de combinación. Por ello, la identificación de la composición del suelo a partir de datos remotos no es tan evidente como en los ensayos de laboratorio. De otra parte, las transiciones electrónicas también producen bandas de absorción, si bien éstas son mucho más anchas que las correspondientes a los fenómenos vibracionales y de un mayor nivel energético, por lo que se manifiestan en el visible y el ultravioleta.

A título de ejemplo, la captura de la energía solar por parte del material vegetal vivo se realiza precisamente mediante la excitación de los electrones de un cierto tipo de orbitales moleculares, denominados π, de las moléculas de dos tipos de clorofila, *a* y *b*, que se promueven a estados energéticos superiores. Posteriormente la energía es cedida (fenómeno de transmisión) a otras moléculas mediante procesos de reducción química. El máximo de absorción de energía se verifica para longitudes de onda de 673 y 683 nm. La clorofila aislada de otras moléculas en laboratorio emite la energía captada mediante fluorescencia, es decir, devuelve la energía previamente absorbida en otras longitudes de onda.

La firma espectral es, en definitiva, consecuencia de la absorción selectiva de la radiación por parte de los componentes de una superficie, entre los que, casi siempre, el agua juega un papel destacado.